

DOI: 10.5846/stxb202107191938

郑贱成, 谢炳庚, 游细斌. 基于土地利用变化的广东省生境质量时空演变特征. 生态学报, 2022, 42(17): 6997-7010.

Zheng J C, Xie B G, You X B. Spatio-temporal characteristics of habitat quality based on land-use changes in Guangdong Province. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(17): 6997-7010.

基于土地利用变化的广东省生境质量时空演变特征

郑贱成¹, 谢炳庚^{1,*}, 游细斌²

¹ 湖南师范大学地理科学学院, 长沙 410000

² 韶关学院南岭振兴发展研究院, 韶关 521008

摘要: 生境质量的高低成为测度地区生态健康及可持续状态的关键因子。广东省生态质量及退化过程复杂, 目前对该领域的研究较为薄弱。利用 FLUS-InVEST 耦合模型, 对广东省 1980—2020 年生境质量变化及未来 2020—2035 年生境质量趋势进行研究。得出以下主要结果: (1) 林地、耕地为广东省的主要土地利用类型, 构成了地表覆盖景观基质; 建设用地增加迅速, 40 年间面积翻了 1.2 倍; 耕地锐减, 面积比由 27.1% 减到 22.8%; 如果继续保持历史变化趋势, 未来 15 年间建设用地面积将继续增加, 耕地面积则减少至不足 22%。(2) 林地集中连片区域主要在北部生态发展区, 耕地集聚分布于东西两翼, 除几个大的水库图斑外, 湿地在整个研究区都有分布; 北部生态发展区域内的林地表现出破碎化特征, 部分区域耕地、湿地都有减小和破碎化趋势。(3) 过去的 40 年, 生境质量变好的区域面积占比最大(44%), 其次是未变化(29%)和减小的区域(27%), 其中, 约 79% 的区域指数值增减在 -0.1—0.1 之间; 未来 15 年里, 质量指数继续增大的区域面积比例将减少到 39%, 继续减小的比例将增大到 31%; 粤港澳大湾区局部低级别生境有连片的趋向。(4) 即使没有土地利用类型转换变化, 部分区域的生境质量也有增加或减小的变化; 但存在土地利用类型变化的区域, 生境质量变化的强度更大。以上结果说明, 广东省生境质量总体较好, 但局部有变差的态势, 土地利用类型变化与生境质量的响应关系较为复杂。认知区域生态环境的特征, 加强土地利用变化与生境质量响应关系及其机理的探究, 可为目前正在实施的生态修复工作提供研究支持。

关键词: 生境质量; 时空异质性; 土地利用/土地覆盖; FLUS-InVEST 耦合模型; 广东省

Spatio-temporal characteristics of habitat quality based on land-use changes in Guangdong Province

ZHENG Jiancheng¹, XIE Binggeng^{1,*}, YOU Xibin²

¹ School of Geographic Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410000, China

² Institute of Nanling Revitalization and Development, Shaoguan University, Shaoguan 521008, China

Abstract: On one hand, habitat quality has become a main factor to measure regionally ecological health and sustainable state. On the other hand, the ecological quality and degradation process in Guangdong Province are complex though solid researches were rarely recorded. Therefore, this paper used the FLUS-InVEST coupling model to study the habitat quality changes in Guangdong Province from 1980 to 2020 and forecasted the future trends from 2020 to 2035. The main results are as follows: (1) Forest land and cultivated land were the main land uses in Guangdong Province, which constituted the landscape matrix of land cover. Construction land has increased rapidly, with the area of 1.2 times in the past 40 years. The area of cultivated land has dropped sharply, with the ratio decreased from 27.1% to 22.8%. The area of construction land was expected to increase and the area of cultivated land would decrease to less than 22% in the next 15 years if following the trends. (2) Forest land was mainly in the northern ecological development area. The cultivated land was concentrated in the

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0502406)

收稿日期: 2021-07-19; 采用日期: 2021-12-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xbgby1961@163.com

east and west wings of Guangdong Province. Except for several large reservoir spots, wetland distributed throughout the study area. The forest land in the northern ecological development area has shown the characteristics of fragmentation, and the cultivated land and wetland in some areas had a trend of decreasing and fragmentation. (3) In the past 40 years, the area of improved habitat quality accounted for the largest proportion (44%), followed by areas that remained unchanged (29%) and decreased (27%). Approximate 79% of regional habitat quality indices increased or decreased between -0.1 and 0.1 . In the next 15 years, the proportion of area where habitat quality continued to increase will decrease to 39%. The proportion will increase to 31%, and the low-level habitat patches in the core area of the Pearl River Delta were expanding. (4) Without land-use changes, there were still diverse habitat-quality changes in some areas. But habitat-quality changes were greater in areas where land uses have been transferred from one to another. The results concluded that the habitat quality in Guangdong Province had the characteristics of overall good advantages and prominent local deterioration, which was the regional characteristics that needed to be recognized in the present ecological restoration work. Relationship between land-use change and habitat-quality effect were much more complex, which needed further reveal in the future studies.

Key Words: habitat quality; spatio-temporal heterogeneity; land use/land cover; FLUS-InVEST model; Guangdong Province

在一定时空范围内,生态系统能够提供给适宜个体与种群持续发展和生存条件的能力,被称之为生境质量^[1-3]。它是生态环境系统客观存在的一种本质属性,这种本质属性的外部特征—生态环境状态,能用定性和定量的方法加以描述^[4],已成为区域生物多样性及生态系统服务功能和水平的重要指示剂,生境质量的高低成为测度地区生态健康及可持续状态的关键因子^[5]。城镇化研究与实践表明,以土地利用方式、强度为变化基础的城市化和产业转型重构,极大改变了原有生境的完整性、结构性和功能性,正在对生态环境产生严重的胁迫效应,甚至引起生态系统退化、环境污染严重、水土资源过度消耗等一系列生态和环境问题^[6]。揭示生境质量变化规律与空间分异特征,预测未来生境变化趋势,必然且迫切地需要成为生态文明建设的基础,为人类改善生态系统服务提供科学依据。

进行生境质量评价是区域生境质量空间分异识别与预测的前提与基础。已有的研究主要从两个方面展开,一方面基于特定对象展开生境质量评价,如 Billionnet 以生物多样性保护为目标,进行了景观破碎化和遗传多样性维持等方面的数学优化研究^[7];Reeder 等进行生境与鱼产卵数量与质量的模型模拟研究^[8]。另一方面则从人类活动影响生境质量视角,进行生境质量评价与归因剖析,探寻人类活动引起的生境质量变化,以及进行未来变化趋势预测。如周婷等借助模型进行神农架林区人类活动与生境质量关系的研究^[9];肖况博士展开了城镇化与生态环境相互作用关系的案例研究^[10];江伟康等结合社会经济及人口分布数据探究各地区城市发展与生境质量的权衡关系,以及预测 2030 年大湾区不同情景下生境质量^[11]。

在人类活动和生境质量关系的研究方面,由于地表土地利用类型转换变化是经济发展与人口向城市集聚引起生境变化最为直观的表现,由此引起生境破碎、退化甚至丧失,已被认为是生境质量下降和生物多样性丧失的最大驱动力^[11],耦合土地利用变化及生境质量变化关系,已成为生境质量评价与预测研究的热点^[12-14]。研究范式从传统构建评价指标体系的方法,逐渐趋向于耦合土地利用空间变化预测和生态模型,对生境质量进行定量化的时空变化特征模拟预测分析^[15]。总体上,这些研究主要是基于区域未来发展的情景假设,预测未来土地利用变化,最后基于土地利用变化估算未来生境质量变化,但缺乏土地利用变化与生境质量响应关系的研究;已有研究主要集中于中小尺度,省域及以上尺度的研究较为鲜见,耦合土地利用变化和生态模型进行广东省生境质量变化的研究缺乏。本文在综合社会经济发展、自然地理和环境等影响因素的基础上,耦合土地利用和生态模型,尝试探测土地利用变化与生境质量响应的关系。

广东省作为我国改革开放的先行地和试验区,已发展成为中国经济发展最快的省份之一,成为我国经济大省和工业强省^[16],如今更是中国大陆与“一带一路”沿线国家经贸合作量最大、人文交流最密切的省

份^[17-18]。高强度的人类活动和快速城市化已对区域生态环境产生了巨大的影响,部分地区生态系统功能下降,已成为经济社会可持续发展的瓶颈^[16]。随着国家打造粤港澳一流湾区战略和省委省政府实施《广东省国土空间规划(2020—2035 年)》过程的推进,广东省经济社会发展已迎来新的机会,生态环境必将面临新的挑战。区域土地利用变化与生境质量之间存在怎样的响应关系?广东省域已存在的明显生态环境区域极差现象^[19],是否会进一步加剧?是推进国土空间优化方案需要首先认知的重要命题。

针对以上问题,基于研究区改革开放以来重要时间节点的土地利用空间数据,本文开展以下研究:(1)借用 FLUS 模型,进行 2035 年土地利用空间分布的模拟预测;(2)借助 InVEST 生境质量模块,估算各时间节点的的生境质量,估算 2035 年生境质量空间分布;(3)基于 GIS 空间分析技术,探索生境质量的时空异质特性,探测土地利用变化对生境质量的影响。目的在于认知研究区土地利用和生境质量的时空演变规律,探究生境质量对土地利用变化的响应,研究结果在一定程度上为推进广东省国土空间规划、缓解一流湾区日益增大的生态环境压力提供研究支持。

1 研究区概况与数据

1.1 研究区概况

以广东省、香港和澳门三地的陆域面积为研究区域(本文统称广东省),约 17.97 万 km²(见广东省国土空间规划(2020—2035 年))^[20]。地势北高南低,北部多山地和高丘陵,南部为平原和山地^[21]。属于低纬度热带亚热带区域,年平均气温 22.3℃,年平均降水量 1300—2500mm。作为改革开放的先行地、试验区、以及中国经济大省和工业强省,在自然条件和经济社会资源方面,其中的珠三角(广州、深圳、佛山、东莞、中山、珠海、江门、惠州、肇庆共 9 市)、香港澳门(珠三角与香港澳门即粤港澳大湾区)与沿海经济带东翼(简称为东翼,共潮州、汕头、揭阳和汕尾 4 市)、沿海经济带西翼(后文简称为西翼,共阳江、茂名和湛江 3 市)、北部生态发展区(后文简称为北部,共云浮、清远、韶关、河源和梅州 5 市)间的悬殊极大(图 1)^[21]。

1.2 数据来源及处理

本文研究思路:基于土地利用及其变化的影响因子数据,模拟 2035 年土地利用空间分布状态;然后对 1980、1990、2005、2020 和 2035 年共 5 个时间节点的的生境质量进行模型估算;最后分析生境质量变化、趋势及空间异质性,资料数据及其来源如表 1 所示。同时考虑 FLUS 模型和 InVEST 模型计算需求,将 22 类土地利用二级分类矢量数据合并成 14 类的矢量数据(表 2),将土地利用、基础地理数据、自然环境和社会经济等所有空间数据都统一到 Krasovsky_1940_Albers 投影坐标系统,将所有数据转换成栅格数据(.tif)格式,空间分辨率为 30m×30m。

2 研究方法

2.1 FLUS 模型

FLUS 由刘小平等于 2017 年提出,是一种综合考虑人类活动与自然因子对土地利用变化的驱动影响,基

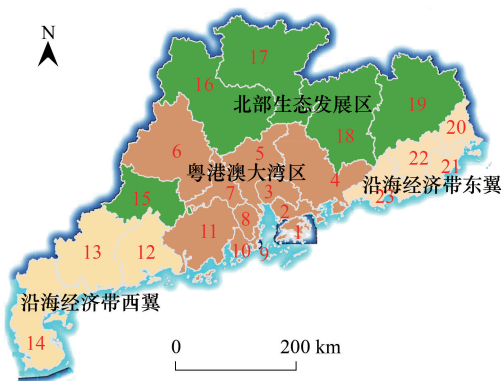


图 1 研究区示意图、行政区划边界及其四大功能区

Fig.1 A diagram for the study area, administrative boundary and its zoning areas

该图是在广东省地理信息公共服务平台提供的标准地图基础上叠图而成。标准地图审图号:粤 S(2019)087 号,底图无修改。数字 1、2、...、11 分别代表粤港澳大湾区的中国香港、深圳、东莞、惠州、广州、肇庆、佛山、中山、澳门、珠海和阳江共 11 市,12、13 和 14 代表西翼的阳江、茂名和湛江共 3 市,15、16、...、19 代表北部的云浮、清远、韶关、河源和梅州共 5 市,20、21、22 和 23 代表东翼的潮州、汕头、揭阳和汕尾共 4 市

于系统动力学(SD)和元胞自动机(CA)的集成土地利用空间分布模拟模型^[22]。相对于传统 CA 模型,FLUS 模型得到了很大的改进与优化,表现在可同时模拟多种土地利用空间分布,综合了气候因子对土地利用变化的影响,以及运用轮盘赌机制确定用地类型是否发生转换等^[23]。为此,FLUS 已被大量运用于土地利用模拟与预测^[23—24]。

表 1 研究数据与资料
Table 1 List of data and references used in this paper

数据类型 Data type	数据 Data		时间 Time	数据来源 Data resource
	名称 Name	格式 Type		
土地利用数据 Land use data	到二级分类的土地利用数据①	矢量数据	1980、1990、2005、 2015、2020 年	中国科学院资源环境科学数据中 心(http://www.resdc.cn)
基础地理数据 Basic geography data	道路数据(铁路、国道、省道、县 道、乡道)		2015 年	
	广东省行政区划边界		2015 年	
	土壤类型		—	
	数字高程模型(DEM)	栅格数据(30m)		
	地貌类型	栅格数据(1km)		
	年平均降水量		2015 年	
自然环境数据 Natural environment data	年均气温			
社会经济数据 The socioeconomic data	国内生产总值(GDP)空间分布			
	人口			
	各市 GDP	excel	2019 年	广东统计信息网(http:// stats. gd. gov. cn/ gdtjnj/ content/ post_3098041. html)
文献资料 Reference	各市人口			
	广东省国土空间规划(2020— 2035 年)	文档		广东省自然资源厅(http://nr. gd. gov. cn/)

①包括水田、旱地、有林地、灌木林、疏林地、其它林地、草地、河渠、湖泊、水库坑塘、滩涂、滩地、城镇用地、农村居点、其他建设用地、沙地、沼泽地、盐碱地、裸土地、裸岩石质地、其它和海洋共 22 个二级类型

2.1.1 模型构建

FLUS 模型包括 SD 和 CA 两个模块,分别用于预测土地利用数量需求和模拟该需求下的土地利用空间分布状态。其中,SD 模块综合考虑历史土地利用、社会经济变化和气候变化等方面,可预测每隔 5 年的土地利用数量需求。CA 模块包括土地利用适宜性概率计算和用地类型转换 CA 决策两个子模块。其中:

(1)适宜性概率计算子模块 是采用神经网络算法(ANN)的局域模拟程序,从一期土地利用数据与多种驱动因子之间关系入手,计算每一种用地类型在各计算单元(栅格像元)适宜性概率;用户可从人类活动与自然环境多个方面构建驱动力因子,如气温、降水、土壤、地形、交通、区位、政策、国内生产总值(GDP)、人口等。参考文献资料^[17,23—24]、研究区的实际、兼顾资料数据的可得性和软件运行条件,选取地形(DEM、坡度、坡向和地貌类型)、土壤类型、气象(年均温、年降雨量)、区位(到城市的距离、到居民点的距离、到国道的距离、到省道的距离、到县道的距离、到乡道的距离、到河流水库的距离、到铁路的距离)、社会经济(人口、GDP 空间分布图)共 17 个影响因子,用于计算各单元上每一种土地利用类型出现的适宜性概率,结果表现为包含适宜性概率的多波段图像(14 个波段,波段数等于土地利用类型数)。

(2)CA 决策子模块 是基于轮盘赌机制用于确定元胞在下一时刻是否发生用地类型转换的计算程序^[23]。具体地讲,一方面需要输入如下数据:已运算得到的土地利用适宜性概率,SD 预测的未来土地利用数量数据以限制土地利用变化数量目标,约束用地变化的限制图层(如本文从水域中提取河流、水库要素生成约束用地变化的限制图层)。

另一方面,需要进行参数设置。①设置土地利用类型转换成本矩阵。转换成本是用于限定各土地利用类型之间的相互关系,是用 0 或 1 表示的矩阵(0 为不能转换,1 为可以转换);②设置邻域因子参数。该参数用

于度量各类型土地利用扩张的能力(可能性大小),其值在 0—1(0 表示扩张能力极弱,1 表示扩张能力极强),如城市用地的邻域因子常被设定为 1(表 2);③保留默认的分析参数设置,包括迭代次数、邻域规则、加速因子和线程,分别为 300、3、0.1 和 1。

表 2 各土地利用类型间转换成本系数及邻域因子权重
Table 2 Conversion cost coefficients between land use types and weights of neighborhood

土地利用类型 Land use type	水田	旱地	有林地	灌木林	疏林地	其它林地	草地	河渠、湖泊	水库坑塘	滩涂、滩地	城镇用地	农村居点	其它建设用地	其它
水田 Paddy	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
旱地 Upland	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
有林地 Woodland	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
灌木林 Shrubbery	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
疏林地 Sparse woodland	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
其它林地 Other woodland	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
草地 Grass	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
河渠、湖泊 Canals, lakes	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
水库坑塘 Reservoir, pit pond	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
滩涂、滩地 Beach, beach land	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
城镇用地 Urban land	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
农村居点 Rural settlement	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
其它建设用地 Others construction	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
其它 Others	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
邻域因子权重 Weight of Neighborhood	0.8	0.7	0.2	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.3	1	0.9	0.5	1

2.1.2 模型训练与验证

软件开发 者刘小平等研究表明,FLUS 模型在地理分区下的模拟精度更佳,模拟效果也优于未分区下的模拟结果^[23];兼顾计算硬件性能,本文将广东省划分为 17 个分区(表 3)。对每一个分区,进行 FLUS 模型的模拟运算。具体步骤为:

表 3 土地利用分区模拟精度验证
Table 3 Accuracy comparison of simulation results under partitioned areas

分区 Zone	OA/%	FoM	分区 Zone	OA/%	FoM
广州	86.0	0.0014	茂名、阳江	79.8	0.0194
东莞、深圳	72.7	1	湛江	81.0	0.0361
惠州	80.2	0.0554	汕头、潮州	81.7	0.0414
佛山	80.9	0.0468	汕尾、揭阳	79.4	0.0487
肇庆	77.1	0.0343	梅州	76.0	0.0700
江门	88.1	0.0420	河源	76.0	0.0700
中山、珠海和澳门	73.3	0.0291	韶关	84.2	0.0130
香港	78.2	0.0190	清远	86.9	0.0126
云浮	84.0	0.0028			

OA/%:总精度,Overall Accuracy(%);FoM:品质因素,Figure of Merit

基于 2015 年的土地利用及 17 个驱动因子数据,首先生成各土地利用类型的适宜性概率空间分布;再从 2020 年土地利用数据,获取各土地利用类型的栅格数;接下来,基于 2015 年土地利用数据,用 CA 模块模拟 2020 年土地利用空间分布;最后,基于软件内嵌的总精度(OA/%)和 FoM 指标模块,将模拟与实际的 2020 年土地利用空间分布比较,计算模拟数据的总精度(OA/%)和 FoM 指标值。其中,FoM(Figure of Merit)是由

Pontius 等提出评估模拟准确性的指标, FoM 仅取决于模拟过程变化元胞的数量, 能够更好地标识模拟的精度, FoM 精度值一般较小^[23]。FoM 的计算公式为^[23,25]:

$$\text{FoM} = B / (A + B + C + D) \quad (1)$$

式中, A 表示观测为变化而预测为不变的误差区域; B 表示观测为变化且预测也为变化的正确区域; C 表示观测变化与预测变化不一致的误差区域; D 表示观测为不变而预测为变化的误差区域。

表 3 的验证结果显示, 所示分区的总精度值都大于 70%, 表明模拟结果与实际情况一致性较高, 除东莞和深圳模拟结果的 FoM 值为 1 外, 其余区域的 FoM 值都在 0—0.1 之间。

2.1.3 2035 年土地利用模拟预测

利用构建好的 FLUS 模型模拟 2035 年土地利用空间分布, 包括三个步骤: ①基于 2005 和 2020 年土地利用栅格图层, 利用 FLUS 模型的 SD 模块, 预测广东省 2035 年土地利用结构的数量; ②基于 2020 年土地利用和 17 种影响因子栅格图层(人口和 GDP 为 2019 年), 利用 ANN 模块计算各用地类型在各单元出现的适宜性概率; ③以 2020 年土地利用图层为起始数据, 以河流、水库要素生成约束用地变化的限制图层, 运行 CA 决策模块以完成预测。

2.2 InVEST 模型

借助 InVEST 模型的生境质量模块(Habitat Quality)计算生境质量指标, 评估研究区生境质量的优劣, 进而反映生态系统提供生物多样性服务的功能(在 InVEST 模型中, 开发者假设生境质量好的地区, 生物多样性也高)^[26]。该模块中, 生境质量指数是区域土地利用类型生境适宜性和生境退化程度的一个无量纲函数指标, 数学函数如下:

$$Q = H(1 - (\frac{D^z}{D^z + k^z})) \quad (2)$$

$$D^z = \sum \sum \frac{\omega}{\sum \omega} r_i \beta S \quad (3)$$

$$i = 1 - \frac{d}{d_{\max}} \quad (4)$$

$$i = \exp(\frac{-2.99d}{d_{\max}}) \quad (5)$$

式中, Q 为某生境栅格的生境质量指数, H 为生境适宜性分值, z 为尺度常数(一般取 2.5), k 为半饱和常数(软件默认取值为 0.5)。 D 为该生境栅格的生境退化度指数, 表示生境受胁迫后呈现的退化程度, 是威胁因子(ω , 各威胁因子的相对重要性值; r , 各威胁因子的栅格数)、威胁与生境栅格之间距离的影响(i)、各种威胁因子对生境栅格的可达性(β)、生境栅格对威胁因子的敏感度(S)共 4 个因子的函数。其中, 假设威胁对生境栅格的距离随着距离衰减, 并假设符合线性或指数距离衰减规律, 分别用式(4)线性模型或式(5)指数衰减模型来估算这种影响(i)。基于以上原理和同区域已有成果^[11], 本文进行生境质量估算的变量或参数如表 4、5。

考虑到计算机硬件计算能力, 采取分区估算生境质量的方案, 即将广东省域按东翼、西翼、粤北和粤港澳大湾区共 4 个分区。具体地, 为避免威胁因子产生边缘效应, 所有威胁因子不分区, 仅将土地利用类型图进行分区剪裁。此外, 除表 4、5 的参数外, 其余未提及的参数都选用软件默认值。

3 结果与分析

3.1 广东省土地利用变化

按土地利用一级分类统计面积(人工表面包括城镇用地、农村居民点和其他建设用地), 绘制图 2。林地(有林地、灌木林地、疏林地和其它林地)、耕地(水田和旱地)为广东省的主要土地利用类型(占比大于 80%), 构成了地表覆盖景观基质。在 1980—2020 年, 各类型土地利用都有面积增加或减少变化, 耕地从 1980

年的 27.1%减至 2020 年的 22.8%,草地从 5.2%减至 4.3%;人工表面从 3.4%增加至 7.6%,林地从 59.7%增至 60.4%;湿地面积比较稳定,起伏变化值约 0.2%。可见,建设用地面积已翻了 1.2 倍;耕减小的耕地占总面积的 4.3%,几乎与建设用地扩张面积比 4.2%相当。基于 2020 年土地利用现状和 2019 年人口、GDP 等 17 个驱动因子,假设土地利用继续保持历史变化速度,到 2035 年,林地面积仍会有少量增加,建设用地面积增至 8.2%,耕地面积则减少至不足 22%。

表 4 威胁因子参数			
Table 4 Threat parameters			
威胁因子 Threat	最大影响距离/km Maximum distance of influence	权重 Weight	空间衰减类型 Spatial decay type
水田 Paddy	8	0.6	线性
旱地 Upland	8	0.6	
城镇用地 Urban land	10	0.9	
农村居民点 Rural settlement	8	0.8	指数
其它建设用地 Others construction	10	1	
沙地 Sand land	10	0.3	
裸土地 Bare land	5	0.2	

表 5 土地利用类型及生境敏感性表								
Table 5 Land use classification system and habitat sensitivity parameter								
土地利用 Land use	生境适宜性 Habitat suitability	威胁因子 Threat						
		水田 Paddy	旱地 Upland	城镇用地 Urban land	农村居民点 Rural settlement	其它建设用地 Others construction	沙地 Sand land	裸土地 Bare land
水田 Paddy	0	0	0	0	0	0	0	0
旱地 Upland	0	0	0	0	0	0	0	0
有林地 Woodland	1	0.6	0.6	0.8	0.7	0.9	0.4	0.3
灌木林 Shrubbery	1	0.6	0.6	0.8	0.7	0.8	0.2	0.2
疏林地 Sparse woodland	1	0.5	0.5	0.8	0.7	0.8	0.1	0.1
其它林地 Other woodland	0.6	0.4	0.4	0.7	0.6	0.7	0.1	0.1
草地 Grass	1	0.3	0.3	1	0.8	1	0.3	0.3
河渠、湖泊 Canals, lakes	1	0.8	0.7	0.9	1	0.9	0.2	0.2
水库坑塘 Reservoir, pit pond	1	0.3	0.3	0.5	0.5	0.5	0.2	0.2
滩涂、滩地 Beach, beach land	1	0.6	0.6	0.7	0.6	0.8	0.4	0.4
城镇用地 Urban land	0	0	0	0	0	0	0	0
农村居点 Rural settlement	0	0	0	0	0	0	0	0
其它建设用地 Others construction	0	0	0	0	0	0	0	0
其它 Others	0	0	0	0	0	0	0	0

广东省土地利用结构具有明显的区域差异(图 3)。人工表面主要分布于粤港澳大湾区和东西沿海经济带,林地全境内都有分布,但集中连片区域主要在北部生态发展区;耕地集聚分布于东西两翼,除几个大的水库图斑外,湿地在整个研究区都有分布。从几个时间节点来看,北部生态发展区内的林地呈现破碎化趋势;部分区域耕地、湿地都有减小和破碎化趋势。如:到 2005 年,佛山、中山市内的湿地图斑破碎化、变小;到 2020 年,只有残存的破碎化图斑;2035 年,境内大块湿地图斑几乎消失。

4 大片区主要土地利用类型统计结果(表 6)显示, 1980—2020 年的 40 年间, 4 大片区林地和耕地面积都有减少趋势, 但耕地面积减少相对较少, 其减小的比例在 0.2%—0.5% 之间; 林地则在 2.3%—9.5%, 其中粤港澳大湾区减小比例高达 9.5%, 其次是东、西两翼, 减小值分别为 4.8%、3.9%, 北部生态发展区的值为 2.3%。相应地, 粤港澳大湾区建设用地增幅最大, 其值从 4.9% 增大至 14.8%; 其次是东、西两翼, 分别是 4.5%—8.5%、5.3%—6.8%; 北部生态发展区的建设用地仅从 1.3% 增至 2.4%。总体看来, 由于区域发展定位的差异, 4 个片区已具有不同的发展特征, 使地表覆盖及其变化都呈现明显的区域差异; 各区域资源优势差异, 主要土地利用转换变化关系也不同。

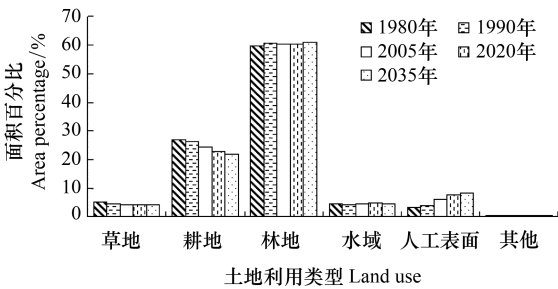


图 2 1980—2035 年各土地利用类型的面积百分比/%
Fig.2 Area percentage of land-use type in 1980, 1990, 2005, 2020 and 2035

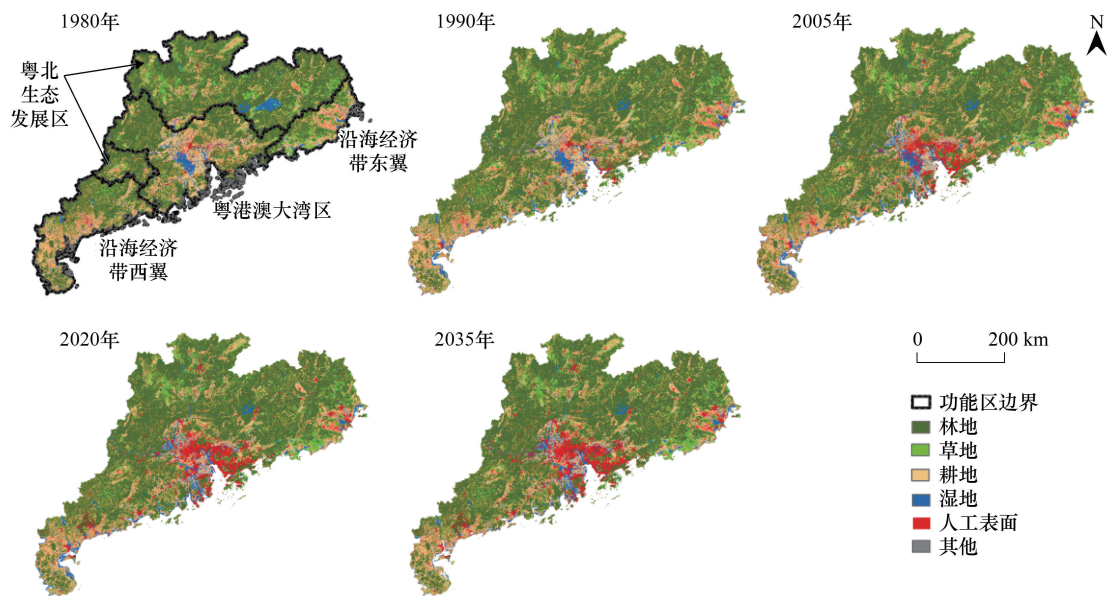


图 3 1980—2035 年土地利用空间分布图谱
Fig.3 Land-use maps in 1980, 1990, 2005, 2020 and 2035

表 6 分四个片区的土地利用结构主要特征(1980—2035 年)

区域名称 Area	范围 Scope	占全省面积 Area percentage/%	主要土地利用类型占区域面积比 Area percentages of key land use types /%		
			林地	耕地	建设用地
粤港澳大湾区 Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area	珠三角、香港和澳门	31	77.6→68.1	4.8→4.5	4.9→14.8
沿海经济带东翼 East wing of the coastal economic belt	潮州、汕头、揭阳和汕尾	9	69.1→64.3	13.5→14.0	4.5→8.5
沿海经济带西翼 West wing of the coastal economic belt	阳江、茂名和湛江	22	73.7→69.8	3.1→2.9	5.3→6.8
北部生态发展区 Northern ecological development zone	云浮、清远、韶关、河源和梅州	39	80.1→81.4	7.5→6.0	1.3→2.4

3.2 生境质量时空变化特征

3.2.1 空间分布特征及其趋势

基于生境质量指数估算结果,采用等间距方法划分 5 个等级,生成生境质量评估等级图谱(图 4)。可以看出,研究区高级(质量指数为 0.8—1)和低级别生境质量(0—0.2)的区域占优势;生境质量的区域差异也十分明显,如粤港澳大湾区呈现大片低级别的生境质量区域,西翼则呈现低级和中等级别生境质量的区域集聚,北部生态发展区则为高级别生境质量的主要集聚区域。随着研究时间由远及近,如粤港澳大湾区的局部区域较高级别生境图斑(蓝色)消失,低级别生境图斑(红色)有扩大之态势(如珠三角核心区域)。总体来看,生境质量及其变化呈现较明显的区域差异,沿海经济带生境质量相对较差。

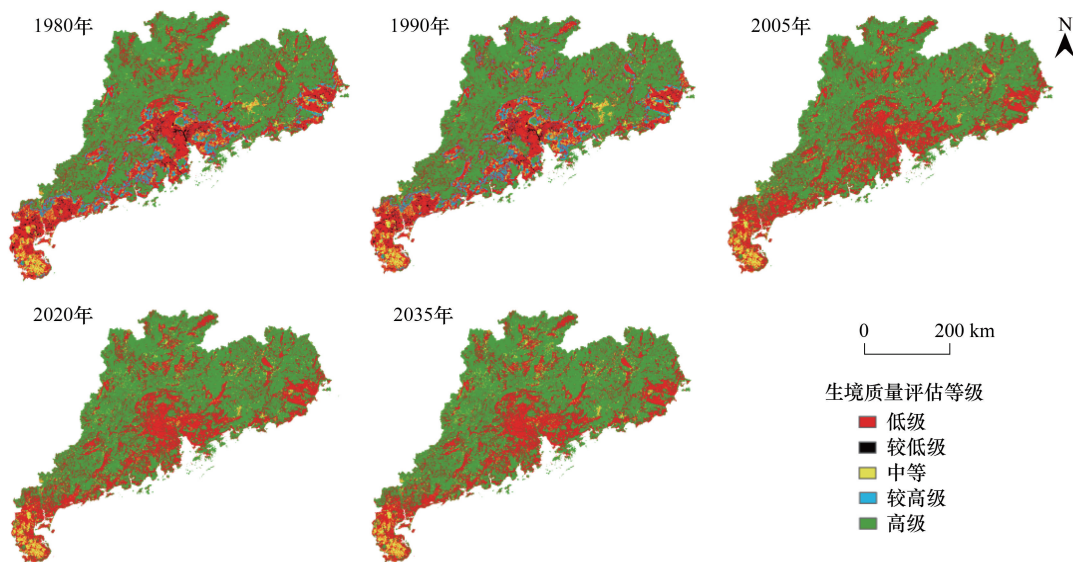


图 4 1980—2035 年生境质量评估等级空间分布图谱

Fig.4 Spatial distribution maps of habitat-quality class in 1980, 1990, 2005, 2020 and 2035

3.2.2 1980—2020、2020—2035 年生境质量变化

将 2020、1980 年、2035、2020 年的生境质量指数栅格图分别相减,得到两个时段的生境质量指数差值图像,图像值为“-”、“0”、“+”表示减小、未变化和增大,分别统计其面积比例,绘制成两个饼图 5(图中“增”代

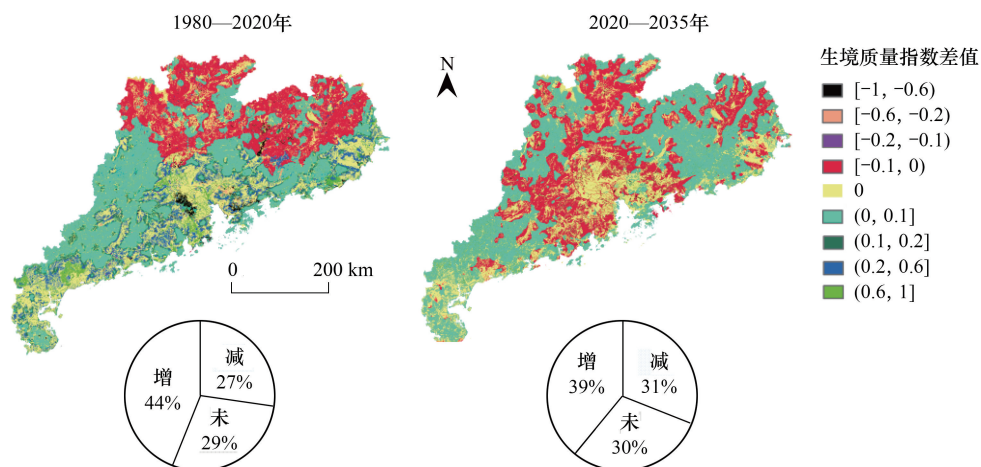


图 5 生境质量变化(1980—2020、2020—2035)

Fig.5 Spatial-temporal distribution maps of habitat quality from 1980 to 2035

表增加,“减”代表减小,“未”代表未发生变化)。已经过去的 40 年,生境质量变好的区域面积占比最大(44%),生境质量未变化和减小的区域面积分别达 29%和 27%。未来生境质量有变差的趋势,表现为生境质量指数增大的区域面积将减到 39%,减小的区域面积则升高到 30%。

以尽可能挖掘生境质量变化规律为原则,经过对差值图像进行自然断点、等间距分类、分位数、直主图分类等分段方法的反复试验,将差值图像划分为 9 个级别,绘制图 5 并统计各值域范围的面积百分比(表 7)。研究区生境质量指数增减的幅度主要在-0.1—0、0—0.1 之间,在 1980—2020 年里,其区域面积分别达 23%和 27.2%,即指数值变幅在-0.1—0.1 之间的区域居绝对优势,面积达 78.8%(包括未变化区域约 28.6%);变幅小于-0.2 的区域占比不大,仅 4%。在未来 2020—2035 的 15 年里,变幅小于-0.2 的区域将会收缩至约 1.9%,但是变幅在-0.1—0 的区域将会扩大至面积约 29.3%;增幅为 0.6—1 的区域,其面积也将由前一段的 3.2%减小为 2%。

表 7 1980—2020、2020—2035 年生境质量指数变化幅度及其比例

Table 7 Change range and the percentage of habitat quality in 1980—2020, and 2020—2035

区域 Scope	1980—2020 年/%								
	[-1,-0.6)	[-0.6,-0.2)	[-0.2,-0.1)	[-0.1,0)	0	(0,0.1]	(0.1,0.2]	(0.2,0.6]	(0.6,1]
广东省 Guangdong Province	1.9	2.2	0.1	23.0	28.6	27.2	5.7	8.2	3.2
大湾区 Greater bay area	3.6	2.9	0.2	0.1	31.7	36.7	8.1	12.2	4.5
东翼 East wing	1.8	1.0	0.1	0.0	36.5	30.8	10.3	14.2	5.2
西翼 West wing	0.8	1.4	0.2	0.1	39.7	28.3	10.1	13.5	5.9
北部 Northern	1.1	2.4	0.0	53.2	20.4	19.1	1.1	2.0	0.6

区域 Scope	2020—2035 年/%								
	[-1,-0.6)	[-0.6,-0.2)	[-0.2,-0.1)	[-0.1,0)	0	(0,0.1]	(0.1,0.2]	(0.2,0.6]	(0.6,1]
广东省 Guangdong Province	1.4	0.5	/	29.3	29.8	37.0	/	2.0	
大湾区 Greater bay area	2.4	0.7		35.1	35.0	24.3		2.6	
东翼 East wing	1.0	0.0		12.8	36.4	47.2		2.5	
西翼 West wing	0.9	0.2		6.7	38.0	51.0		3.3	
北部 Northern	0.9	0.5		37.8	21.6	38.3		0.9	

图表都揭示生境质量变化存在极明显的区域异质特征。过去 40 年间,北部生态发展区有约 53%的区域指数变幅在-0.1—0 之间(图 5 大片红色),如果保护历史发展趋势,未来 15 年里,仍将有约 38%的区域继续保持这个降幅,但是已开始从原来的成片大块开始离散。粤港澳大湾区前一时段生境降幅在-0.6—1 的区域也从原来的 3.6%降到未来的 2.4%,并且不再是成片集聚状态(图 5 中部的黑色斑块,图 5 中已消失);-0.1—0 的区域面积则由原来的 0.1%,猛增至 35.1%。其它经济带区域也呈现出类似于粤港澳大湾区的这种降幅特征。总体来看,不管是过去还是未来,生境质量有向好趋势,局部也生境质量下降;如果研究区发展按历史趋势下去,粤港澳大湾区未来生境质量值得引起更多关注;承担生态发展功能区的北部区域,需要采取措施进一步提升生境质量。

3.3 生境质量对土地利用变化的效应

为探讨土地利用变化对生境质量变化的影响,特基于土地利用变化统计生境质量指数变化。具体地做法如下:将对应于生境质量较高的林地、湿地、草地合并为一种类型(称之为自然表面),转移关系明显的耕地单独为一类,生境质量较低的城镇用地、农村居民点和其他建设用地合并为一类(人工表面),生成包括其它共四种类型的土地利用图;利用始末(1980、2020 年)期土地利用图像获取土地利用类型转换关系(如表 8:耕地分别转出为自然表面、人工表面、其它等)图像,同期生境质量指数图像相差得到生境质量增减变化图像;最后基于转移关系,分区统计生境质量增、减或不变的区域面积及其百分比。在过去的 40 年里,耕地转出为人工表面、自然表面的比例最大,占研究区总面积约达 3%、2.3%;然后是自然表面转出为人工表面(1.7%)、耕地(0.8%);面积约 0.6%的人工表面转出到耕地、自然和其它三类地类;最后,约 0.1%的其它类转出。

表 8 生境质量指数变化与土地利用转换的关系(1980—2020 年)

Table 8 Quantitative relationship between land-use transfer and habitat-quality index changes during 1980—2020

生境质量指数变化均值及其面积 百分比 Average and its area percentage of habitat-quality index/%	无转出 No change	土地利用转移关系 Transfer relationship between land-use types												百分比 的和 Sum/%
		耕地 Cropland→			自然 Natural surface→			人工 Artificial surface→			其它 Others→			
		自然 Natural	人工 Artificial	其它 Others	耕地 Cropland	人工 Artificial	其它 Others	耕地 Cropland	自然 Natural	其它 Others	耕地 Cropland	自然 Natural	人工 Artificial	
不变	0	/			0			/			0	/	0	/
No change	25.3		3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4		0.0	0.0		0.0	29
增大	0.12	0.93	/	1.00	/	0.43	/	0.96	1.00	/	0.28	/	/	
Added part	41.5	2.3		0.0		0.0		0.2	0.0		0.1		44	
减小	-0.0266	-0.29	-0.77	-0.69	-0.84	-0.74	-0.60	-0.66	-0.35	-0.99	-0.95	-0.10	-0.94	/
Reduced part	24.7	0.0	0.0	0.0	0.8	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	27
百分比的和 Sum/%	91.5	2.3	3.0	0.0	0.8	1.7	0.0	0.4	0.2	0.0	0.0	0.1	0.0	100

表中“耕地”“自然”“人工”“其它”分别指耕地、自然表面、人工表面和其它四种景观型

土地利用与生境质量指数增、减变化的关系较为复杂。一是,在生境质量指数值不变化的区域(29%),也有耕地、自然、人工和其它类型之间的转移关系,其中耕地转出为人工表面的比例最大,为区域总面积的3%;然后是人工表面转出到耕地(0.4%)。二是,没有发生土地利用类型转换的区域(91.5%),仍然有生境质量指数增大和减小变化,其中总面积41.5%区域的生境质量增加,生境质量减小的区域达24.7%;但是,相对于发生了土地利用转换关系的区域,生境质量指数增加或减小值都是最小的。三是,使生境质量指数增加最大的是耕地→其它、人工表面→其它的转移关系,指数增加均值接近1;其次是人工表面→自然表面、耕地→自然表面,指数增加均值分别为0.96、0.93;然后是自然表面→其它、其它→自然表面。使生境质量指数减小最多的是人工表面→其它、其它→耕地和人工表面;然后是自然表面→耕地、耕地→人工表面、自然表面→人工表面。总的来看,耕地和自然表面转换到人工表面是主要的土地利用转换关系;虽然土地利用类型转换影响到生境质量指数变化,但是在没有土地利用类型转换的区域也存在生境质量指数的变化,生境质量对土地利用变化的响应关系较为复杂。

4 讨论

4.1 基于 FLUS-InVEST 耦合模型的生境质量预测

本文利用 FLUS-InVEST 耦合模型进行生境质量估算。其中,FLUS 模型被用于模拟 2035 年研究区土地利用空间分布状态。该模型是一种新型的土地利用变化模拟模型^[24],与传统预测模型不同,它基于神经网络算法从一期土地利用数据与包含多种驱动力因子关系,计算各类用地类型在研究范围内的适宜性概率。传统 CA^[22]、CLUE^[27]等传统的预测模型在进行土地利用预测时,需要基于历史数据,计算各土地利用类型的概率转移矩阵,然后假设这种趋势不发生改变,再对未来相等时间间隔的土地利用空间布局进行模拟预测。正是因为 FLUS 基于某用地类型在空间上出现的适宜概率而对未来分布状态进行模拟,预测时的基准土地利用及其驱动因子的时间越接近,预测模型的效果将会越好;相反,如果二者时间相关越远,将影响到预测效果。

考虑到对构建的模型训练及验证需要,本文选取 2015 年土地利用数据及同年的驱动因子,预测 2020 年土地利用空间分布状态;将其与 2020 年土地利用现状图层进行叠置进行验证,然后调试模型参数,直到精度满足需求。最后,再基于 2020 年土地利用现状数据及相近年份人口、GDP 等驱动因子,预测 2035 年土地利用的空间分布。预测表明,如果继续保持历史变化趋势,至 2035 年建设用地面积将增至 8.2%,耕地面积则减少至不足 22%。从图 2、3 的结果及其反映的土地利用变化趋势来看,预测结果比较符合规律。尽管如此,由于驱动因子并非同年份的数据,可能会对预测结果有一定影响。此外,2019 年 11 月,中办、国办联合印发《关于在国土空间规划中统筹划定落实三条控制线的指导意见》,明确了“三条线”划定的基本原则、具体要求和管制规则,这一指导意见的实施,必将对未来土地利用空间分布产生重要的影响,如果能将三条线的内容或部分内容作为约束条件,加入到 CA 决策模块,定将使模拟结果更符合将来的实际情况。因此,本文土地利用预测结果仅仅是保持历史趋势的情况,并将之运用于生境质量趋势分析。其可靠性与科学性还等进一步提高。

InVEST 的生境模块假定生境质量取决于一个生境对人类土地利用和这些土地利用强度的可接近性,模拟建模时假设一些土地利用类型是生境质量退化的威胁源,并使用这些威胁源图层来评估不同土地利用类型对应的生境质量退化程度,进而估算生境质量。正因为此,研究区边界源于属于人工划定的行政区划边界,研究边界之外的生境威胁将会影响到研究区域的生境。出于计算机计算能力的缘故,利用 InVEST 模型估算生境质量时,特按照研究区的四大片区(三大经济功能)剪裁土地利用类型现状数据,实施分片计算;所有驱动因子数据全部保持全域范围的图层,以最大可能地避免威胁因子边缘效应的影响。从图 4、5 和表 7 展现的生境质量时空变化特征来看,FLUS-InVEST 耦合模型估算的生境质量规律比较符合实情。由于广东省域林地、耕地、湿地和草地面积占比较大,加上经济发展到一定水平后人们对美好生活的向往与需求,以及我国近二十年以来的生态环境保护措施,研究区生境质量总体上并未向恶化趋势转化,但一定要注意局部区域生境质量的下滑以及下滑区域面积集聚成片的现象。这一结论表明,本文采用的耦合模型及其运算结果具有一定可靠性。

4.2 生境质量动态变化规律和区域差异

土地利用结构中,林地持续保持绝对的优势比例(60%左右),耕地、草地和湿地等自然地表覆盖类型也有相当的比例。从自然地表类型分布看,林地全境内都有分布,集中连片区域主要在北部生态发展区;耕地集聚分布于东西两翼,除几个大的水库图斑外,湿地在整个研究区都有分布,研究区域生态环境具有独特的优势和特色,不愧为中国资源大省^[28]。

从 1980—2020 年生境质量指数变化值来看,生境质量变好的区域面积占比最大(44%),其次是未变化(29%)和减小的区域(27%),二者面积比较接近。其中,约 79%的区域指数值增减在-0.1—0.1 之间(表 7)。如果区域社会经济保持历史趋势发展的话,未来 15 年里土地利用转换关系仍然主要是耕地转出和建设用地转出,耕地和建设用地面积将占区域总面积的 22%和 8.2%。正是因为这个原因,生境质量指数增大的区域面积减小至 39%,质量指数减小的面积将增大到 31%。从几个时间节点来看(图 4),北部生态发展区域内的林地表现出破碎化特征;部分区域耕地、湿地都有减小和破碎化趋势。随着研究时间由远及近,粤港澳大湾区的局部区域较高级别生境图斑(蓝色)消失,低级别生境图斑(红色)有扩大之态势(如珠三角核心区域),沿海经济带尤其是邻海区域的低级别生境斑块几乎连片。景观生态学认为格局和过程相互作用,结构一般比功能更容易研究,我们可以通过研究景观格局特征推测过程,从而认识景观功能^[29]。李永洁等^[30]研究表明,广东省生态系统退化过程及其空间格局复杂,同时受高强度人类活动和显著气候变化影响,生态系统退过程和驱动机制也愈加复杂。近年来,广东省针对生态脆弱区和重点区域开展山水林田湖草沙生态保护修复工程试点建设,已取得重要成绩^[29];但是,由于生态系统本身的复杂性及社会经济发展水平的区域差异,未来还需进一步加强生态环境格局异质性、过程驱动机制及机理研究。

4.3 区域生境质量对土地利用变化的响应

以林地为主要土地覆盖类型的北部生态发展区是高级别生境质量集聚区域,大片低级别生境质量主要分布于建设用地集聚的粤港澳大湾区,东西翼是耕地的主要分布区域,也是低级和中等级别生境质量的集聚地(图 3、4)。土地利用类型与生境质量高低密切联系^[3]。生境质量较高的土地利用类型有林地、河渠、湖泊、水库、草地,较低的土地利用类型有滩涂、滩地以及在生境质量计算中作为威胁因子的水田、旱地、城镇用地、农村居民点和其他建设用地等。

由于当地政府实施乡村“万村土地整治”、“村居整治”等国家工程以及城市“三旧改造”、“城市更新”等地方性政策^[17-18],面积约 0.6%的人工表面转出到耕地、自然和其它三类地类;但是至 2020 年,研究区主要的土地利用转换关系仍然是耕地转出、人工表面的转入以及少量林地的转入与转出。土地利用类型转换变化已被认为是生境质量下降的最大驱动力^[11, 31],本研究也显示,有土地利用类型转换的区域,生境质量有较大值的增加或减小变化;部分没有土地利用类型转换的区域,生境质量的变化值较小,生境质量对土地利用类型转换变化的响应关系较为复杂。从公式(2)—(5)可知,生境质量是各生境的适宜性、威胁因子及其数量、威胁因子与生境距离及可达性、生境对威胁的敏感性等的函数,生境质量与土地利用类型转换变化的关系及其机理待进一步深挖。

5 结论

本文利用 FLUS-InVEST 耦合模型,进行 1980—2020 年广东省生境质量变化及未来 2020—2035 年生境质量趋势研究。得出以下主要结论:

研究区生态系统具有多样性和复杂性,生态环境质量状态总体良好。由于生态系统本身的复杂性及社会经济发展水平的区域差异,区域生态系统结构与生境质量存在明显的区域异质性。林地是占绝对优势的用地类型,主要分布于北部山地,对应的生境质量较高;城镇用地、农村居民点和其它等建设用地对应的生境质量偏低,未来生境质量降低的集聚区可能位于粤港澳大湾区。主要的土地利用转换关系为耕地转出、建设用地的转入以及少量林地的转入与转出;不管是否存在土地利用类型转换变化,区域生境质量都可能随时间而增

加或减小,但存在土地利用类型转换变化的区域,生境质量变化的强度更大,生境质量对土地利用转换变化的响应关系较为复杂。近年来,针对生态脆弱区和重点区域,广东省正开展山水林田湖草沙生态保护修复工程试点建设,如果同步加强全域生态环境景格局异质性、过程驱动机制及机理研究,可促进生态修复工作的实施。

参考文献 (References):

- [1] Fellman J B, Hood E, Dryer W, Pyare S. Stream physical characteristics impact habitat quality for pacific salmon in two temperate coastal watersheds. *PLoS One*, 2015, 10(7): e0132652.
- [2] Hillard E M, Nielsen C K, Groninger J W. Swamp rabbits as indicators of wildlife habitat quality in bottomland hardwood forest ecosystems. *Ecological Indicators*, 2017, 79: 47-53.
- [3] 王耕, 王佳雯. 丹东沿海地区土地利用变化对生境质量的影响研究. *生态环境学报*, 2021, 30(3): 621-630.
- [4] 叶文虎, 栾胜基. 环境质量评价学. 北京: 高等教育出版社, 1994: 6.
- [5] 黄鑫, 程文仕, 李晓丹, 杨昌裕, 邢秀为. 甘肃省生境质量变化的图谱特征. *应用生态学报*, 2020, 31(9): 3131-3140.
- [6] 宋永永. 黄土高原城镇化过程及其生态环境响应[D]. 西安: 陕西师范大学, 2019.
- [7] Billionnet A. Mathematical optimization ideas for biodiversity conservation. *European Journal of Operational Research*, 2013, 231(3): 514-534.
- [8] Reeder W J, Gariglio F, Carnie R, Tang C L, Isaak D, Chen Q W, Yu Z B, McKean J A, Tonina D. Some (fish might) like it hot: habitat quality and fish growth from past to future climates. *Science of the Total Environment*, 2021, 787: 147532.
- [9] 周婷, 陈万旭, 李江风, 梁加乐. 1995—2015 年神农架林区人类活动与生境质量的空间关系研究. *生态学报*, 2021, 41(15): 6134-6145.
- [10] 肖况. 城镇化与生态环境相互作用关系研究——以成都市为例[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- [11] 江伟康, 吴隼宇. 基于地区 GDP 和人口空间分布的粤港澳大湾区生境质量时空演变研究. *生态学报*, 2021, 41(5): 1747-1757.
- [12] Zhang X R, Song W, Lang Y Q, Feng X M, Yuan Q Z, Wang J T. Land use changes in the coastal zone of China's Hebei Province and the corresponding impacts on habitat quality. *Land Use Policy*, 2020, 99: 104957.
- [13] Tang F, Fu M C, Wang L, Zhang P T. Land-use change in Changli County, China: predicting its spatio-temporal evolution in habitat quality. *Ecological Indicators*, 2020, 117: 106719.
- [14] Gomes E, Inácio M, Bogdzevič K, Kalinauskas M, Karnauskaitė D, Pereira P. Future scenarios impact on land use change and habitat quality in Lithuania. *Environmental Research*, 2021, 197: 111101.
- [15] 武丹, 李欢, 艾宁, 黄涛, 顾继升. 基于 CA-Markov 的土地利用时空变化与生境质量预测——以宁夏中部干旱区为例. *中国生态农业学报*, 2020, 28(12): 1969-1978.
- [16] 李永洁, 王鹏, 肖荣波. 国土空间生态修复国际经验借鉴与广东实施路径. *生态学报*, 2021, 41(19): 7637-7647.
- [17] 简钰清, 陈颖怡, 谢圆圆, 龚建周. 1980—2015 年广东省乡村聚落的空间特征与演变. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(6): 698-706.
- [18] 简钰清, 龚建周, 罗雅红, 李佰和. 广东省乡村聚落地演变及其主控因子分析. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(2): 155-163.
- [19] 曾庆泳, 陈忠暖. 基于 GIS 空间分析法的广东省经济发展区域差异. *经济地理*, 2007, 27(4): 558-561, 574-574.
- [20] 张杰, 李清泉, 吴祥茵, 张晨晨, 王敬哲, 郭国锋. 基于土地利用的粤港澳大湾区生态系统服务价值及承载力演变分析. *生态学报*, 2021, 41(21): 8375-8386.
- [21] 吴玮怡, 钟凯文, 许剑辉. 广东省县域经济差异时空演化及影响因素研究. *测绘科学*, 2021, 46(6): 156-163.
- [22] Liu X P, Liang X, Li X, Xu X C, Ou J P, Chen Y M, Li S Y, Wang S J, Pei F S. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 168: 94-116.
- [23] 赵林峰, 刘小平, 刘鹏华, 陈广照, 何家律. 基于地理分区与 FLUS 模型的城市扩张模拟与预警. *地球信息科学学报*, 2020, 22(3): 517-530.
- [24] 张经度, 梅志雄, 吕佳慧, 陈进钊. 纳入空间自相关的 FLUS 模型在土地利用变化多情景模拟中的应用. *地球信息科学学报*, 2020, 22(3): 531-542.
- [25] Varga O G, Pontius Jr R G, Singh S K, Szabó S. Intensity Analysis and the Figure of Merit's components for assessment of a Cellular Automata-Markov simulation model. *Ecological Indicators*, 2019, 101: 933-942.
- [26] 黄木易, 岳文泽, 冯少茹, 张嘉晖. 基于 InVEST 模型的皖西大别山区生境质量时空演化及景观格局分析. *生态学报*, 2020, 40(9): 2895-2906.
- [27] 文雅, 龚建周, 胡根根, 胡志仁. 基于生态安全导向的城市空间扩展模拟与分析. *地理研究*, 2017, 36(3): 518-528.
- [28] 蒋超, 龚建周, 陈晓越, 孙家仁. 广东省土地利用阶段特征及动态研究框架探讨. *广东农业科学*, 2019, 46(8): 146-157.
- [29] 郭建国. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级(第二版). 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [30] 罗明, 周妍, 鞠正山, 魏洪斌, 张世文. 粤北南岭典型矿山生态修复工程技术模式与效益预评估——基于广东省山水林田湖草生态保护修复试点框架. *生态学报*, 2019, 39(23): 8911-8919.
- [31] 董建红, 张志斌, 笕晓军, 张文斌, 冯雪丽. “三生”空间视角下土地利用转型的生态环境效应及驱动力——以甘肃省为例. *生态学报*, 2021, 41(15): 5919-5928.